

Comunicación /
Communication
Sección B/Section B
Vol. 16, nro. 2
e3383

Oportunidades y retos de los programas públicos y privados de mejoramiento genético de maíz en Latinoamérica, caso México

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz[1]*, **María Gricelda Vázquez-Carrillo**[2]

[1]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Programa de Maíz región del Bajío. Celaya, Guanajuato. México.

[2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz. Coatlinchan, Texcoco, México.

*Autor para correspondencia / Corresponding Author, e-mail: repreciado@yahoo.com

Challenges and opportunities of public and private maize breeding programs in Latin America, case Mexico

Resumen

En Latinoamérica, los programas de mejoramiento genético de maíz, dependientes de universidades e instituciones de investigación financiadas con recursos públicos, contrastan con los programas de mejoramiento de las empresas semilleras multinacionales, nacionales y regionales en diversos aspectos como: la disponibilidad de recursos económicos; la perspectiva del mercado; el tipo de materiales mejorados; los usuarios de los materiales generados; el aprovechamiento y uso de la diversidad genética; los esquemas de mejoramiento utilizados; el término a corto, mediano y largo plazo de los proyectos de investigación; el trabajo interdisciplinario e interinstitucional; entre otros. El objetivo del presente documento es resaltar las ventajas y oportunidades para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable, cuyos frutos impactarán la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria; además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático; a través del capital humano altamente especializado, los recursos genéticos e infraestructura existente en las universidades e instituciones de investigación del sector público en Latinoamérica. Para implementar estos proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales se requiere de la incidencia y participación de varios factores: a) la voluntad de interacción entre los investigadores altamente especializados en diversas disciplinas adscritos en distintas instituciones, b) la disponibilidad de las instituciones participantes que permitan la utilización de los recursos humanos, genéticos y de infraestructura, c) la disponibilidad de fuentes de financiamiento nacionales e internacionales que privilegien el trabajo interdisciplinario e interinstitucional y, d) la creación de políticas públicas que apoyen la generación de tecnología e innovación, que incidan en el desarrollo agrícola y social, partiendo de que la investigación debe ser considerada como un gasto de inversión y un bien público por los gobiernos latinoamericanos. Estas interacciones harán posible potenciar los limitados recursos de investigación. A manera de ejemplo se presentan resultados de investigación, donde a través del trabajo interdisciplinario e interinstitucional se logró la generación de conocimiento científico y la liberación de maíces especializados de alto contenido de aceite, pigmentados y pozoleros con mayor valor agregado. Así mismo se tiene la experiencia y las fuentes de germoplasma para implementar líneas de investigación para





Editado por / Edited by: María Gabriela Albán

Recibido / Received: 02/07/2024

Aceptado / Accepted: 19/08/2024

Publicado en línea / Published online: 15/10/2024

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383




obtener maíces tolerantes a las micotoxinas (*fusarium* y *aflatoxinas*), así como para buscar la eficiencia en el uso de fósforo, junto con otras líneas de investigación para generar maíces tolerantes y eficientes a factores bióticos y abióticos adversos que se están incrementando por los efectos negativos del cambio climático.

Palabras clave: Investigación interdisciplinaria e interinstitucional, maíces especializados, mayor valor agregado.

Abstract

Public-funded maize breeding programs belonging to universities and research institutions in Latin America contrast with breeding programs of regional, national, and international private seed companies in several aspects, such as research funding availability, market perspective, breeding products developed, users of products, use of maize genetic diversity, breeding schemes, short-, medium-, and long-term research projects, among others. The objective of this paper is to analyze and highlight the advantages and opportunities to implement short, medium, and long-term innovation and technological development projects with a sustainable horizon; by high impact in alimentation, health, nutrition, agricultural development, and food safety; and also to contribute to reducing the negative effects of climate change; by highly specialized researchers; and by the use of genetic resources as breeding germplasm and capacities of universities and public research institutions in Latin America. To be able to implement these interdisciplinary and interinstitutional projects it is necessary to consider the incidence and participation of several factors such as: a) the willpower for interaction between highly specialized researchers from different disciplines belonging to different institutions, b) availability of involved institutions to allow the use of human and genetic resources and their facilities, c) availability of national and international funds, privileging interdisciplinary and interinstitutional research, d) the creation of public policies to support innovation and technology generation research to impact food safety, nutrition, health, social and agricultural development, since research has to be considered an investment and a public good for Latin-American governments. As an example of medium-term interdisciplinary and interinstitutional work, it has been released high-quality, specialty, and value-added maize hybrids such as high-oil content, pigmented (blue and red) maize, and pozolero type. Also, there have been advances and sources of germplasm to implement research lines to obtain tolerant materials for mycotoxins (*aflatoxins* and *fusarium*), phosphorus use efficiency, along with other research lines to generate tolerant and efficient varieties for adverse biotic and abiotic factors produced by the negative effects of climate change.

Keywords: Interdisciplinary and interinstitutional research, specialty and value added maize.

Para que la agricultura continúe con su aportación de manera significativa en la producción, abasto y transformación de alimentos, es imperativo apuntalar e iniciar líneas de investigación que incidan en el desarrollo de tecnologías para enfrentar los efectos negativos del cambio climático, que ponen en riesgo la producción, así como el deterioro de la sanidad y calidad de los alimentos, que cada vez son más afectados por las fluctuaciones térmicas que inciden en las poblaciones de insectos plaga y vectores de enfermedades foliares y de mazorca, en especial los patógenos

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



que generan micotoxinas, que de manera preocupante ponen en alto riesgo la salud humana. Además, la precipitación pluvial, cada día más errática, incrementa los riesgos de estrés hídrico en los cultivos, añadido al encarecimiento y menor disponibilidad de agua para riego. Ante estos escenarios, queda en entredicho la sustentabilidad de la agricultura empresarial altamente tecnificada, que, para obtener mayores potenciales de rendimiento, requiere intensificar el uso de labranza, irrigación e insumos derivados de procesos industriales.

Probablemente el maíz es uno de los cultivos que más se ha investigado a nivel mundial, sin embargo, por sus características genéticas y amplia variabilidad, cada día es posible plantear nuevos retos para incrementar la producción, sanidad y calidad de los alimentos, y el valor agregado, así como reducir costos y riesgos de producción [1]. La mayoría de estos retos son factibles de enfrentar a través de un trabajo de investigación interdisciplinario e interinstitucional que permita aprovechar la diversidad genética, los mecanismos hereditarios, los esquemas de mejoramiento, así como nuevas herramientas tecnológicas de laboratorio para asistir la selección de maíces que impacten en las diversas cadenas de valor.

En Latinoamérica, los programas de mejoramiento genético de maíz dependientes de universidades e instituciones de investigación financiadas con recursos públicos, contrastan con los programas de mejoramiento de las empresas semilleras multinacionales, nacionales y regionales en una serie de aspectos, entre los que se encuentran: la disponibilidad de recursos económicos, la perspectiva del mercado, el desarrollo de materiales mejorados, los usuarios de los materiales generados, el aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente, los esquemas de mejoramiento utilizados, el término a corto, mediano y largo plazo de los proyectos de investigación, el trabajo interdisciplinario e interinstitucional, entre otros.

El objetivo del presente documento es resaltar las ventajas y oportunidades para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable, cuyos frutos impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático, a través del capital humano altamente especializado, los recursos genéticos y la infraestructura existente en las universidades e instituciones de investigación del sector público en Latinoamérica.

La investigación, innovación y desarrollo tecnológico agrícola en general y de maíz en particular que se realiza en universidades e instituciones de investigación pública se debe considerar como un gasto de inversión y un bien público por los gobiernos latinoamericanos [2], cuyos frutos a corto, mediano y largo plazo impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria de Latinoamérica, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático.

Ante la problemática anterior, en la tabla 1 se presenta de manera comparativa algunos aspectos importantes entre el trabajo que se realiza en los programas de investigación de universidades e instituciones de investigación del sector público con los programas financiados por el sector privado, cuyos objetivos son meramente comerciales y poco

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



sustentables en el futuro, debido a que están enfocados al desarrollo de tecnologías del tipo Revolución Verde (con uso intensivo de fertilizantes, pesticidas, riegos y semilla híbrida), alejándose de su carácter de bien público y de las necesidades tecnológicas del "paradigma de sostenibilidad" (que hace énfasis en el manejo de los recursos naturales) [2].

Tabla 1. Aspectos comparativos importantes entre los programas de mejoramiento genético de maíz de universidades e instituciones de investigación del sector público y las empresas del sector privado en América Latina.

	Aspectos	Universidades e instituciones de investigación pública	Empresas semilleras privadas
1	Disponibilidad de recursos económicos.	Escasa, limitada y competida.	Mayor disponibilidad.
2	Perspectiva del mercado.	Enfoque alimentario, social, salud y económico.	Enfoque comercial.
3	Tipo de germoplasma desarrollado.	Germoplasma de maíz resistente a factores bióticos y abióticos, diferenciados, nutracéuticos y con mayor valor agregado.	Maíces de alto rendimiento altamente demandantes de insumos.
4	Usuarios de los materiales generados.	Agricultura tradicional y de subsistencia así como programas de mejoramiento públicos y privados.	Productores empresariales.
5	Aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente en maíz.	Alta.	Baja.
6	Esquemas de mejoramiento utilizados.	Mejoramiento participativo, Pre-mejoramiento, selección recurrente, e hibridación.	Hibridación.
7	Duración de los proyectos de investigación.	Corto, mediano y largo plazo.	Corto plazo.
8	Interacción interdisciplinaria e interinstitucional (equipos de laboratorio modernos y herramientas biotecnológicas) .	Alta.	Baja.

Entre los aspectos descritos, se detallan algunas diferencias en ambos tipos de programas:

1. No obstante que se han registrado tasas de retorno superiores al 40 % en la inversión en la investigación agropecuaria [2], la disponibilidad de recursos económicos para la investigación en los programas de universidades e instituciones de investigación del sector público generalmente es escasa, limitada y competida en la mayoría de los países latinoamericanos. Esto se debe a: reducciones presupuestarias de los gobiernos por austeridad fiscal; incomprensión de los tomadores de decisión nacionales del papel crucial de la agricultura en las políticas de desarrollo; falta de reconocimiento de la naturaleza de la investigación agropecuaria como bien



público; retiro del apoyo de los donantes; disminución a largo plazo en los precios de los productos agropecuarios básicos, que desalienta la inversión en el sector agropecuario; entre otros [2]. Una comparación de los sistemas de investigación agropecuaria en Latinoamérica fue realizada con base en la inversión de los países en investigación y desarrollo, en donde México ocupa una posición intermedia, superado ampliamente por Brasil y Argentina. [3] En cambio, las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— que son activas en los mercados de insumos agropecuarios pueden fraccionar los costos fijos por medio de muchos mercados nacionales de productos. Además, como tienen acceso a los mercados financieros mundiales, con frecuencia pueden llegar, en forma más fácil y económica, al capital empresario y de riesgo para la financiación de la investigación [2].

2. La perspectiva del mercado en universidades e instituciones de investigación del sector público normalmente tiene un enfoque de tipo social, cuyos productos de investigación pueden ser definidos con el término *innovación social*, partiendo de que toda innovación se relaciona con el factor social como solución a los problemas a resolver de forma colectiva y participativa para atender el bienestar y estabilidad de la sociedad. Por lo tanto, la innovación social debe ser impulsada por instituciones públicas, educativas y centros de investigación para buscar estar a la vanguardia y al nivel de otros países desarrollados [4]. Los objetivos de la investigación buscan impactar en la producción, la alimentación, la calidad y sanidad de los alimentos, el valor agregado, así como el desarrollo de germoplasma para enfrentar los riesgos del cambio climático y su inestabilidad; a medida que la prioridad que tienen la investigación y el desarrollo tecnológico va más allá de la búsqueda de incrementos de la productividad, es decir, hacia objetivos como la calidad del producto y la protección ambiental, habrá entonces demanda de un conjunto nuevo de bienes públicos [2]; En cambio, normalmente, el objetivo de las empresas privadas es más comercial y enfocado a mercados de agricultura empresarial de alta producción sin restricciones en el manejo de insumos.

3. El desarrollo de germoplasma mejorado en universidades e instituciones de investigación del sector público presenta la oportunidad de generar fuentes de germoplasma con mayor valor nutritivo, nutracéutico, funcional, eficiente y resistente a factores bióticos y abióticos a través de esquemas de mejoramiento a mediano y largo plazo, con miras a enfrentar los riesgos del cambio climático y su inestabilidad. En cambio, en las empresas privadas, el desarrollo de germoplasma es mínimo, ya que normalmente su objetivo es a corto plazo, a través de la generación de nuevas combinaciones de híbridos con mayor potencial de rendimiento adaptados a sistemas de producción altamente demandantes de insumos, labranza y riego.

4. Los usuarios de los materiales generados por las universidades e instituciones de investigación del sector público normalmente son pequeños productores que practican agricultura tradicional y de subsistencia, y que, a través de esquemas de autoabastecimiento de semilla de híbridos y variedades de polinización libre, constituyen un recurso y no un insumo dentro del sistema de producción; o bien, programas de mejoramiento públicos y privados interesados en utilizar el germoplasma desarrollado en esquemas de mediano y largo plazo como fuente

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



de mejoramiento genético. En el caso de las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— sus usuarios son productores altamente tecnificados sin restricciones de maquinaria, equipo, riego y utilización de insumos.

5. Aprovechamiento y uso de la diversidad genética existente en maíz: las universidades e instituciones de investigación del sector público tienen la oportunidad de utilizar los materiales nativos como fuente de germoplasma para desarrollar maíces diferenciados con mayor valor agregado que sean de interés para usos específicos En las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— normalmente manejan una base genética muy restringida, donde utilizan esquemas de reciclaje de líneas a través del método genealógico, por lo que el uso de la diversidad genética es menor.

6. Los esquemas de mejoramiento utilizados por las universidades e instituciones de investigación del sector público se enfocan en el desarrollo de germoplasma a través de la utilización de esquemas de mejoramiento participativo y pre-mejoramiento en materiales nativos, selección recurrente e hibridación en diversas fuentes de germoplasma, que permiten la generación de materiales genéticos para su siembra por productores en distintos sistemas de producción, así como para utilizarlos de fuente de germoplasma en programas de mejoramiento genético. En las empresas privadas —sobre todo las multinacionales— normalmente el esquema de mejoramiento utilizado es la hibridación.

7. Las universidades e instituciones de investigación del sector público tienen la oportunidad de plantear esquemas de trabajo a corto, mediano y largo plazo, en los que es posible desarrollar germoplasma con características diferenciadas, así como poblaciones eficientes y resistentes a diversos factores bióticos y abióticos producidos por el cambio climático y su inestabilidad, a través de esquemas de selección recurrente. En cambio, en las empresas privadas, los mejoradores tienen la presión de sacar nuevas combinaciones híbridas más productivas que superen a las anteriores en el menor plazo posible y difícilmente invierten en esquemas de selección a largo plazo que les permitan generar germoplasma para enfrentar riesgos de producción en el futuro.

8. En la actualidad, en diversas instituciones de investigación y enseñanza del país se han fortalecido y consolidado varios grupos de investigación con investigadores altamente especializados en diversas disciplinas, como química de alimentos, tecnología de alimentos, salud, nutrición humana y animal, biotecnología, desarrollo de productos industriales, entre otros. Estos han aportado al mundo nuevo conocimiento científico y tecnológico con un impacto en la salud y alimentación de la población mundial. También, dichos grupos de investigación cuentan con la infraestructura y equipos modernos que les permiten asistir en la selección de productos bioactivos, biofortificados y nutracéuticos a partir de maíces especializados, de tal manera que la interacción interdisciplinaria e interinstitucional con los programas de mejoramiento genético para aprovechar los materiales genéticos desarrollados nos da la oportunidad para integrar proyectos a nivel nacional e internacional que tengan un impacto de gran alcance en la alimentación y salud de los consumidores, así como en la industria pecuaria y de transformación.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



Además, la estrategia de trabajo interdisciplinario e interinstitucional hará posible potenciar la investigación ante los limitados recursos disponibles para investigación. Con respecto a las empresas privadas, por lo general, debido a que manejan pactos de secrecía internos relacionados con métodos y procesos que deriven en la propiedad intelectual de la empresa [5], carecen de la oportunidad de interacción interinstitucional y la posible interacción interdisciplinaria se debe circunscribir de manera interna entre los empleados de la misma empresa.

No obstante la gran importancia de la disponibilidad y gestión de fuentes de financiamiento para la investigación, este tema resulta muy complejo y fuera de nuestro alcance; por lo que en este documento se pretende enfatizar en las grandes ventajas de capital humano altamente especializado, recursos genéticos e infraestructura de las instituciones públicas para realizar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto y con un horizonte más sustentable que la investigación realizada por las empresas privadas. Para implementar estos proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales se requiere de la incidencia y participación de varios factores: a) la voluntad de interacción entre los investigadores altamente especializados en diversas disciplinas adscritos a distintas instituciones, b) la disponibilidad de las instituciones participantes que permitan la utilización de los recursos humanos, genéticos y de infraestructura, c) la disponibilidad de fuentes de financiamiento nacionales e internacionales que privilegien el trabajo interdisciplinario e interinstitucional y, d) la creación de políticas públicas que incidan en la generación de tecnología e innovación que impacte la seguridad alimentaria, la nutrición, la salud y el desarrollo agrícola y social en nuestros países.

Con base en los aspectos descritos anteriormente, se presentan algunos ejemplos de experiencias, resultados y logros a través de la interacción interdisciplinaria e interinstitucional entre investigadores adscritos a instituciones públicas de investigación y universidades en México. A través de diversas líneas de investigación, se ha presentado la oportunidad de implementar proyectos a mediano y largo plazo con la intención de tener un impacto en el desarrollo agrícola y social; además de que, con estas interacciones, se ha contribuido a la formación de recursos humanos a nivel posgrado.

Tal es el caso del desarrollo de maíces con alto contenido de aceite (ACA), que buscan impactar en la alimentación humana y pecuaria. Estos maíces fueron generados a través de un esquema de selección recurrente (SR) asistida con espectrofotometría de rayos infrarrojos cercanos (NIRS) en cuatro poblaciones contrastantes en color de grano (blanco y amarillo) y adaptación (Bajío y Noroeste de México). La respuesta a la selección a través de ocho ciclos de SR, en las cuatro poblaciones, se tuvo un incremento en el contenido de aceite de 4 % en C_0 a más de 8 % en C_8 [6]. Adicionalmente a través de interacciones con investigadores del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) se estudió el perfil de ácidos grasos a través de los ciclos de selección en las cuatro poblaciones estudiadas [7] y [8], así como el contenido de tocoferoles, fitoesteroles y carotenoides [9].

En ciclos avanzados de selección en las cuatro poblaciones de ACA, se derivaron líneas doble haploides (LDH) con la intención de generar a corto plazo híbridos de ACA. Estas LDH fueron obtenidas a través de la interacción con el Centro Internacional de

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383





Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) donde se utilizó el procedimiento siguiente: 1) Inducción de haploidía, en el que la polinización es por medio de la cruza del germoplasma fuente (poblaciones de ACA) con el polen del inductor de haploidía RWS x UH400 de origen alemán, 2) identificación de semilla con haploidía usando el marcador Navajo R_1-n_j, 3) duplicación de los cromosomas con un inhibidor mitótico (colchicina) y 4) autofecundación de las plantas duplicadas para incrementar la semilla de las nuevas líneas generadas [10].

A través de estudiantes de posgrado del Tecnológico Nacional de México, Campus Roque (TecNM-Roque), y en interacción con sus profesores, se planteó una metodología para la selección de LDH por su comportamiento agronómico *per se* en diversas localidades y a través de cruzamientos de prueba, con el fin de identificar líneas superiores con buena respuesta heterótica y buen comportamiento agronómico [11]. Posteriormente, del grupo de LDH superiores seleccionado de las cuatro poblaciones se realizaron esquemas de cruzamientos dialélicos para identificar líneas de grano blanco [12] y para líneas de grano amarillo [13] con buena aptitud combinatoria. Esta información sentó las bases para la formación, desarrollo, evaluación y liberación del híbrido trilineal de ACA de grano amarillo H-327 AO [14], de los híbridos trilineales ACA de grano blanco H-388 O [15] y H-389 O [16] y recientemente el híbrido de cruza doble H-393 O [17]. Todos ellos adaptados a las regiones subtropicales de México.

En esta misma línea de investigación de ACA se han realizado trabajos en interacción con investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), donde se estudió la bioaccesibilidad y capacidad antioxidante en compuestos fenólicos y oligosacáridos en chips de maíz con frijol [18] y con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de Querétaro (CINVESTAV-QRO), donde fueron estudiados los ácidos grasos y propiedades del almidón de híbridos de ACA durante su proceso de nixtamalización y el proceso de elaboración de tortillas [19]. Los maíces de ACA tienen un impacto en la calidad de grano que permite obtener productos nixtamalizados con características reológicas superiores [20]; también, por su mayor valor energético, pueden tener un impacto en la elaboración de alimentos balanceados para la avicultura y porcicultura; finalmente, constituyen una excelente fuente de materia prima para la elaboración de alimentos industrializados.

Otro ejemplo del trabajo de interacción entre los investigadores que trabajan en mejoramiento genético con investigadores de diversas instituciones y disciplinas en México tiene que ver con la generación de maíces especializados que permiten el aprovechamiento de los recursos genéticos, y que pueden aportar beneficios a la salud de los consumidores por sus características bioactivas, biofortificadas y nutracéuticas, y que por su mayor valor agregado pueden impactar en el desarrollo agrícola de regiones específicas [21].

Entre este tipo de maíces de mayor valor agregado, se han realizado trabajos con maíces pozoleros (utilizados para elaborar un platillo típico mexicano llamado pozole) en interacción con investigadores del ITESM, donde se estudió la presencia de ácidos fenólicos y actividad antioxidante en maíces pozoleros [22]. En interacción con investigadores de la UAQ, se estudió el efecto del complejo amilosa lípidos en la elaboración de pozole [23].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



En el grupo de calidad del propio INIFAP, estos maíces fueron caracterizados por su rendimiento de grano, propiedades físicas y reológicas y contenido de antocianinas [24]; así como la calidad de grano floreado y contenido de fitoquímicos [25]. Uno de los frutos de estos trabajos con maíces pozoleros fue el registro y liberación del híbrido no convencional de maíz pozolero H-302 PZ adaptado a regiones subtropicales de México. R. Preciado-Ortiz (datos sin publicar) [26].

En otra investigación en interacción con el ITESM se determinó el perfil nutracéutico en maíces pigmentados de grano azul y rojo, [27]. En esta línea de investigación, se formaron, desarrollaron, evaluaron y liberaron los híbridos trilineales de maíz de grano azul H-303 Zahie (R. Preciado-Ortiz, datos sin publicar) [28] y de grano rojo H 304 R, (R. Preciado-Ortiz, datos sin publicar) [29], adaptados a regiones subtropicales de México.

Los ejemplos de líneas de investigación anteriores han tenido resultados favorables y con un impacto tanto en los productores como en los consumidores; sin embargo, aún nos encontramos lejos de tener resultados sistemáticos y extensivos con impactos que puedan incidir en diversas regiones y países.

Por otro lado, ya se han identificado y desarrollado fuentes de germoplasma para iniciar nuevas líneas de investigación a través de proyectos interdisciplinarios e interinstitucionales para la obtención de maíces eficientes en el uso de fósforo a través de la interacción con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) [30], [31] y [32]; en interacción con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para la generación de maíces tolerantes a micotoxinas (*aflatoxinas* y *fusarium*) [33]; así mismo, para generar maíces tolerantes y eficientes a factores bióticos y abióticos adversos que se están incrementando por los efectos negativos del cambio climático.

A manera de conclusión, se puede decir que existe una oportunidad de realizar trabajos de investigación interdisciplinaria e interinstitucional que involucre investigadores especialistas en diversas disciplinas, adscritos a instituciones públicas en Latinoamérica. Además, con estos trabajos de interacción será posible potenciar las limitadas fuentes de financiamiento, y permitirán implementar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico de alto impacto, con un horizonte más sustentable, y cuyos frutos impactarán en la alimentación, salud, nutrición, desarrollo agrícola y seguridad alimentaria, además de contribuir a reducir los riesgos de los efectos negativos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Tecnologías de frontera para impulsar la producción sostenible de maíz en las Américas -Tech Maíz- financiado por el programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED- y la Red Latinoamericana del Maíz por gestionar la elaboración y publicación de este artículo. También, se agradece a todos los investigadores, estudiantes y personal de apoyo de todas las instituciones que han participado en diversas etapas para la generación de los híbridos que han sido generados.




CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz, elaboró el manuscrito y desarrolló en campo el material genético descrito en el documento; María Gricelda Vázquez-Carrillo participó en la elaboración del manuscrito y asistió la selección en laboratorio del material genético descrito en el documento.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés en el presente trabajo.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



REFERENCIAS

[1] Preciado-Ortiz, R. E., & Vázquez-Carrillo, M. G. (2022). Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en México. *Avances en Ciencias e Ingenierías, 14(1)*. https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

[2] Echeverría, R. G., Trigo, E. J., & Byerlee, D. (1996). Institutional change and effective financing of agricultural research in Latin America. (Technical Paper No. 330). *World Bank*. https://shorturl.at/PJeFb

[3] Nin-Pratt, A., Stads, G.-J., de los Santos, L., & Muñoz, G. (2023). Desatando la innovación: Evaluación del papel de la I+D agropecuaria en América Latina y el Caribe. http://dx.doi.org/10.18235/0005006

[4] Moreno-Ortiz, A. L. (2023).Importance of agricultural activity and social innovation in public research centers: a bibliometric analysis. *Scientia et Praxis, 3(05)*. https://doi.org/10.55965/setp.3.05.a1

[5] Salazar, S., & Henríquez, P. (2020). Guía para la gestión de la propiedad intelectual en consorcios regionales de investigación agrícola. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*. https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8195/BVE19040294e.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[6] Ortega-Corona, A., Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Guerrero-Herrera, M. J., García-Lara, S., & Serna-Saldívar, S. O. (2015). Selection response for oil content and agronomic performance in four subtropical maize populations. *Maydica, 60*, 1-8. https://core.ac.uk/outputs/230662315/?source=oai

[7] Preciado-Ortiz, R. E., García-Lara, S., Ortiz-Islas, A., Ortega-Corona, A., & Serna-Saldivar, S. O. (2013). Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research, 142,* 27-35. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019

[8] Ortiz-Islas, S., García-Lara, S., Preciado-Ortiz, R. E., & Serna-Saldívar, S. O. (2018). Fatty acid composition and proximate analysis of improved high-oil corn double haploid hybrids adapted to subtropical areas. *Cereal Chemistry 96(2),* 182-192. https://doi.org/10.1002/cche.10109

[9] García-Lara, S., Rodríguez-Treviño, A., Ortiz-Islas, S., Preciado-Ortiz, R. E., & Serna-Saldívar, S. O. (2023). Increase of tocopherols, phytosterols, and carotenoids in high-oil subtropical maize after recurrent selection. *Cereal Chemistry 100(6),* 1379-1389. https://doi.org/10.1002/cche.10720

[10] Prasanna, B. M., Chaikam, V., & Mahuku, G. (2012). Doubled haploid technology in maize breeding: Theory and practice. *CIMMYT.*

[11] Silva-Venancio, S., Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Ortiz-Islas, S., Serna-Saldivar, S. O., García-Lara, S., Terrón-Ibarra, A. D., & Palacios-Rojas, N. (2019). Identification of superior doubled haploid maize (*Zea mays*) inbred lines derived from high oil content subtropical populations. *Maydica, 64,* 1-11. https://core.ac.uk/download/pdf/230663341.pdf

[12] Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J., & Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos heteróticos en líneas doble haploides de maíz de grano blanco y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnia Mexicana, 41(2),* 177-186. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802018000200177&script=sci_arttext

[13] Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J., & Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos genéticos en líneas doble haploides de maíz de grano amarillo y alto contenido de aceite. Revista Fitotecnia Mexicana, 41(3), 301-310. https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.301-310

[14] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., & Briones-Reyes, D. (2019). H-327 AO, híbrido trilineal de maíz oleoso de grano amarillo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 42(3),* 313-315. https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.313

[15] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., Briones-Reyes, D., & Peña-Ramos, A. (2019). H-388 O, híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 42(3),* 309-311. https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.309

[16] Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, M. G., Gómez-Montiel, N. O., Briones-Reyes, D., & Peña-Ramos, A. (2019). H-389 O, híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 42(3),* 183-185. https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.183

[17] Silva-Venancio, D. M., Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2023). Ventajas productivas en la región del Bajío del H-393 O híbrido de cruza doble de maíz (*Zea mays, L.*), de grano blanco con alto contenido de aceite. *Revista Tecnológica CEA: Número especial, 8(23)*, 1476-1485. https://revistatecnologicacea.mx/revista22/

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383



[18] Luzardo-Ocampo, I., Campos-Vega, R., Gaytán-Martínez, M., Preciado-Ortiz, R. E., Mendoza, S., & Loarca-Piña, G. (2017). Bioaccessibility and antioxidant activity of free phenolic compounds and oligosaccharides from corn (*Zea mays L.*) and common bean *(Phaseolus vulgaris L.*) chips during in vitro gastrointestinal digestion and simulated colonic fermentation. *Food Research International, 100,* 304-311. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.018

[19] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., Figueroa-Cárdenas, J. D., Guzmán-Maldonado, S. H., Ramos, D. S., & Topete-Betancourt, A. (2018). Fatty acids and starch properties of high-oil maize hybrids during nixtamalization and tortilla-making process. *Journal of Cereal Science, 83,* 171-179. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.015

[20] Vázquez-Carrillo, M. G., Preciado-Ortiz, R. E., Santiago-Ramos, D., Palacios-Rojas, N., Terrón-Ibarra, A. D., & Hernández-Calette, A. (2018). Estabilidad del rendimiento y calidad de grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 41,* 509-518.

[21] Hellin, J., Keleman, A., López, D., Donnet, L., & Flores, D. (2013). La importancia de los nichos de mercado: Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 36(3),* 315-328. https://dx.doi.org/10.35196/rfm.2013.3-S3-A.315

[22] Peralta-Veran, L., Espinosa-Leal, C., Escalante-Aburto, A., Preciado-Ortiz, R. E., Puente-Garza, C. A., Serna-Saldívar, S. O., & García-Lara, S. (2022). Effects of pozole broth production on phenolic acids and antioxidant activity of specialty maize landraces. Journal of *Cereal Science, 107,* 103543. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103543

[23] Dorantes-Campuzano, M. F., Cabrera-Ramírez, A. H., Rodríguez-García, M. E., Palacios-Rojas, N., Preciado-Ortíz, R. E., Luzardo-Ocampo, I., & Gaytán Martínez, M. (2022). Effect of maize processing on amylose-lipid complex in pozole, a traditional Mexican dish. *Applied Food Research, 2(1)*, 100078. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100078

[24] Preciado-Ortiz, R. E., Ochoa-Centeno, N. J., Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., & Terrón-Ibarra, A. D. (2022). Grain yield, physical and pasting properties, and anthocyanins of non-conventional pigmented corn hybrids for pozole end-use adapted to subtropical regions. *Applied Food Research, 2(2),* 100180. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100180

[25] García-Cruz, L., Vázquez-Carrillo, M. G., & Preciado-Ortiz, R. E. (2023). Flowered grain quality and phytochemical content of non-conventional maize hybrids from the Mexican subtropics across three growing cycles. *Plants, 12(14),* 2691. https://doi.org/10.3390/plants12142691

[26] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-302 PZ, híbrido no convencional de maíz pozolero de grano rojo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* (en prensa).

[27] Urias-Peraldí, M., Gutiérrez-Uribe, J. A., Preciado-Ortiz, R. E., Cruz-Morales, A. S., Serna-Saldívar, S. O., & García-Lara, S. (2013). Nutraceutical profile of improved blue maize (Zea mays) hybrids for subtropical regions. *Field Crops Research, 141(1),* 69-76. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.008

[28] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-303 Zahie, híbrido trilineal de maíz de grano azul adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* (en prensa).

[29] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, M. G., & Terrón-Ibarra, A. D. (2024). H-304 R, híbrido trilineal de maíz de grano rojo adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* (en prensa).

[30] Bayuelo-Jiménez, J. S., & Bravo-Hernández, N. L. (2011). Eficiencia fósforo en maíz criollo de la Meseta Purhépecha, Michoacán. En R. E. Preciado-Ortiz & S. Montes (Eds.), Amplitud, mejoramiento, usos y riesgos de la diversidad genética de maíz en México (pp. 223-239). *Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C.*

[31] Flores-Torres, E., Ochoa-Cadavid, I., Preciado-Ortíz, R. E., & Bayuelo-Jiménez, J. S. (2016). Variabilidad genotípica en maíz nativo para eficiencia y respuesta a fósforo en etapa de floración. *Revista Fitotecnia Mexicana, 39(4),* 339-347. https://doi.org/10.35196/rfm.2016.4.339-347

[32] Ochoa-Cadavid, I., Preciado-Ortíz, R. E., & Bayuelo-Jiménez, J. S. (2019). Interacción Genotipo × Ambiente y estabilidad en rendimiento de variedades de maíz en condiciones contrastantes de fósforo. *Agrociencia, 53(3),* 337-353. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1788

[33] Sánchez-Isordia, N. D., Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Terrón-Ibarra, A. D., Reyes-Méndez, C. A., Gómez-Montiel, N. O., García-Perea, M. A., Ramírez-Pimentel, J. G., & Moreno Martínez, E. (2019). Yield potential and aflatoxin resistance in subtropical maize hybrids. *Environmental Analysis & Ecology Studies, 7(1).* https://doi.org/10.31031/EAES.2020.07.000654

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3383